

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и
исследовательской деятельности
Южного федерального университета
д.х.н.

А. В. Метелица

«24» апреля 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» на диссертацию Шефера Ильи Александровича «Устойчивость двухслойных течений в горизонтальном канале при диффузионном испарении», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Шефера Ильи Александровича посвящена изучению характеристик совместных течений испаряющейся жидкости и парогазовой смеси в плоском горизонтальном канале и анализу их устойчивости в рамках двухсторонней модели испарительной конвекции.

Актуальность темы диссертации. При изучении явлений конвективного теплообмена в условиях испарения, наблюдаемых в природных и промышленных системах, и разработке новых технологий, применяемых в материаловедении, теплофизике, биомедицине, химической и пищевой промышленности и основанных на использовании испаряющихся жидкостей, требуется полное и точное описание процессов переноса, учитывающее фазовые превращения и наличие поверхностей раздела жидкость – газ. В двухфазных/многокомпонентных неизотермических системах наблюдается сложное взаимодействие между конвекцией, теплопроводностью и диффузией в объёмных фазах и поверхностными явлениями,

которое играет важную роль в формировании конвективных режимов и возникновении неустойчивостей различной природы. Математические модели, сформулированные в рамках механики сплошной среды и применяемые для описания смешанной конвекции в условиях фазовых переходов, отличаются неклассическим типом определяющих уравнений и сложные граничные условия на межфазных границах. Апробация математических моделей испарительной конвекции, определение условий их применимости к описанию динамики реальных физических систем представляют одну из важнейших теоретических задач. В настоящее время накоплена большая база экспериментальных данных характеристик режимов течений жидкости, увлекаемой спутным газовым потоком, когда испарение с поверхности жидкости индуцировано прокачкой газа. Наличие таких экспериментальных данных позволяет верифицировать не только сами математические модели, основанные на использовании уравнений Навье – Стокса (или их приближений) для несжимаемых сред и позволяющие корректно учесть фазовые переходы диффузионного типа, но и теоретические подходы к описанию испарительной конвекции, развиваемые в рамках этих моделей. Один из подходов связан с использованием точных решений групповой природы определяющих уравнений. Построение и анализ точных решений уравнений конвекции расширяет класс доступных для изучения задач и позволяет проводить качественное моделирование процессов переноса. Определение кризисных механизмов и получение критических характеристик устойчивости являются важным этапом при разработке экспериментальных методов исследования испарительной конвекции, а также при изучении разнообразных природных процессов. В ряду работ, развивающих возможности теории конвекции, находится и диссертационная работа И. А. Шефера «Устойчивость двухслойных течений в горизонтальном канале при диффузионном испарении». Основное внимание уделено изучению степени и характера влияния различных факторов на характеристики устойчивости двухфазных течений в условиях диффузионного испарения. Актуальность тематики работы, как части фундаментальных научных исследований, имеющих в перспективе практические приложения, не подлежит сомнению.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, в котором обосновывается актуальность темы диссертации и формулируется цель исследований, четырёх глав, заключения, списка литературы, содержащего 150 наименований, и трёх приложений. Общий объём диссертации составляет 146 страниц, включая 45 рисунков и 17 таблиц.

В первой главе представлены постановка задачи испарительной конвекции на основе уравнений Обербека – Буссинеска и анзац исследуемого точного решения, принадлежащего классу решений Бириха. Введены основные критерии подобия и сформулирована задача об устойчивости точного решения в рамках линейной теории.

Во второй главе на примере реальных жидкостей изучаются характеристики двухслойных течений с испарением диффузионного типа в плоском канале с нагреваемыми по линейному закону стенками. Исследуется влияние интенсивности гравитационного и внешнего теплового воздействия, термодиффузионных эффектов, толщины слоёв рабочих сред, скорости прокачки газа и граничных тепловых режимов на структуру конвективных режимов и скорость испарения. Строится обобщение точного решения на случай неоднородного испарения. На основе сравнения расчётных данных, полученных на основе нового точного решения, с известными экспериментальными данными выделена постановка задачи и указаны условия, обеспечивающие удовлетворительное качественное и количественное согласие с данными экспериментов. Предложено расширение классификации Наполитано типов двухслойных течений.

Третья глава посвящена исследованию устойчивости течений испаряющейся жидкости, увлекаемой спутным газовым потоком, относительно плоских возмущений. Изучено влияние гравитации, толщин слоёв, поперечного перепада температуры, расхода газа и условия теплоизоляции верхней стенки на пороговые характеристики устойчивости течений при постоянной скорости испарения. Изучены свойства и типы возникающих характеристических возмущений, описаны механизмы их формирования. Установлен колебательный характер неустойчивости во всех

рассмотренных конфигурациях, получены зависимости фазовых скоростей возмущений от соответствующих управляющих параметров.

В четвёртой главе в рамках линейной теории определены пороги конвективной устойчивости при изменении конфигурации волны возмущения, гравитационного воздействия, толщин слоёв и дополнительном нагреве снизу в случае пространственных возмущений. Исследовано влияние деформируемости межфазной границы на характеристики устойчивости. Показано, что неустойчивость в двухфазной системе проявляется в форме упорядоченных продольных и/или поперечных структур различной симметрии. В случае деформируемой границы раздела жидкость – газ обнаружена смена критической моды для систем с разной толщиной жидкого слоя. Установленные на основе точного решения закономерности формирования разных типов неустойчивости и зависимости критических характеристик от параметров задачи имеют экспериментальное подтверждение в работах В. П. Реутова с соавторами (2007) и О. А. Кабова и Ю. В. Люлина с соавторами (2011, 2014, 2020).

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Приложение 1 содержит описание алгоритма построения точного решения, отвечающего случаю однородного испарения. Приводятся явные представления искомых функций, параметров решения и констант интегрирования.

В Приложении 2 изложен алгоритм построения точного решения, описывающего двухфазные течения с неоднородным испарением.

В Приложении 3 приведены значения теплофизических параметров сред, используемые при проведении расчётов.

Научная новизна. К настоящему моменту хорошо изучены вопросы, связанные с возникновением термокапиллярной и/или термоконвекционной конвекции в слоях испаряющихся жидкостей/жидких растворов и покоящихся многослойных системах, а также с устойчивостью стационарных течений в отсутствие фазовых переходов жидкость – пар как в областях со свободными границами, так и с внутренними поверхностями раздела. Причём большинство результатов получено в рамках приближения тонкого слоя. Качественно новые свойства конвекция приобретает в условиях

фазовых переходов и/или при комбинированном действии различных механизмов. В рецензируемой работе с позиций теории устойчивости исследовано влияние различных факторов, таких как геометрия системы, гравитация, прокачка газа, приложенная тепловая нагрузка, граничный тепловой режим, на свойства течений в рамках двустороннего подхода, учитывающего присутствие испаряемого компонента в газовой фазе, вклад диффузионного испарения на межфазной границе и термодиффузионных эффектов. На основе частично-инвариантного точного решения уравнений термоконцентрационной конвекции изучены и описаны общие закономерности формирования, взаимодействия и поведения нестационарных возмущений двухфазных стратифицированных течений и вычислены пороговые характеристики, определяющие тепловую нагрузку, приводящую к потере устойчивости. В диссертационной работе впервые:

1. Построено обобщение точного решения, принадлежащего классу решений Остроумова – Бириха, на случай неоднородного испарения вдоль межфазной поверхности. На основе сравнения с известными экспериментальными данными выполнена верификация решения, проведена апробация возможных корректных постановок краевых задач испарительной конвекции, выделены варианты граничных условий для функции температуры и паросодержания, обеспечивающие качественное и количественное согласование с данными экспериментов.

2. Проведено систематическое исследование устойчивости точного решения, описывающего двухслойные течения в плоском горизонтальном канале в условиях однородного испарения диффузионного типа. Определены пороги конвективной устойчивости для систем с разной толщиной слоёв рабочих сред в условиях различных граничных тепловых режимов. Исследовано влияние гравитации и кинематических характеристик газового потока на устойчивость рассматриваемых двухслойных течений.

3. Изучен спектр двумерных и трёхмерных характеристических возмущений, проведён отбор термокапиллярных, вихревых и конвективных структур и детальный анализ механизмов и условий их формирования. Установлено, что для большинства рассматриваемых конфигураций наиболее

опасными являются пространственные возмущения. Описано возникновение режимов пространственной неустойчивости в форме валиковой конвекции.

4. Установлено стабилизирующее влияние деформируемости границы раздела жидкость – газ на характеристики устойчивости двухфазных течений с диффузионным испарением. Формы неустойчивости, возникающие в системе с деформируемой границей и предсказываемые на основе точного решения, подтверждаются данными экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость. Диссертация носит теоретический характер. Полученные результаты вносят вклад в теорию конвективной устойчивости, в теоретические основы экспериментальных методов исследования испарительной конвекции. Полученные аналитические результаты позволяют понять и оценить степень влияния отдельных факторов на устойчивость комбинированных двухслойных течений, установить основные закономерности формирования пространственной неустойчивости в условиях диффузионного испарения и могут служить основой для построения иерархии моделей испарительной конвекции. С практической точки зрения полученные результаты могут быть использованы при разработке теплофизических экспериментов, связанных с изучением неізотермических течений жидкостей с испарением, индуцированным продувом газа, и определении методов управления конвективными течениями при разработке методик термического осушения и нанесения покрытий. Полученное точное решение может быть использовано для определения ряда параметров (коэффициентов Соре и Дюфура, коэффициента концентрационного расширения плотности газа), отсутствующих в справочной литературе

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается использованием корректной физически обоснованной постановки задачи испарительной конвекции, применением численных методов с контролем точности, подтверждается сравнением с результатами других авторов, полученными для предельных случаев, и результатами экспериментов.

Замечания по содержанию диссертации.

1. В тексте диссертации автор использует термин «слабое» испарение. Существует ли количественный критерий, позволяющий различать режимы

«слабого» и «сильного» испарения? Можно ли рассматривать параметр E , введённый на стр. 37, в качестве такого критерия в рассматриваемой в диссертации задаче?

2. На стр. 56 в Замечании 5 автор отмечает, что для точного решения, построенного в рамках задачи, учитывающей вклад эффекта термодиффузии, доказан предельный переход в решение, полученное для задачи с $\alpha_T = 0$. При этом влияние термодиффузионных эффектов на характеристики устойчивости не исследовалось. Сохраняется ли указанное свойство для решения спектральной задачи?

3. В п. 4.3 упоминается, что формы неустойчивости, предсказываемые на основе точного решения, наблюдаются в экспериментах. Указывается на совпадение форм гидродинамического полей, хотя решение также предсказывает богатое разнообразие тепловых структур, порождаемых тепловыми возмущениями. Проводилось ли сравнение тепловой картины возмущённых режимов?

Закключение. Высказанные замечания не снижают ценности, научной и практической значимости работы и общей положительной оценки диссертации. Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации. В нём последовательно сформулированы положения, выносимые на защиту, и представлены основные результаты работы, полностью соответствующие поставленным целям и задачам.

Основные научные результаты диссертации докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях и с достаточной полнотой **опубликованы** в 8 статьях в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (все статьи опубликованы в журналах, индексируемых в системах цитирования Web of Science и Scopus).

Диссертация И. А. Шефера соответствует отрасли «физико-математические науки», а содержательная часть и полученные результаты соответствуют паспорту научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы по направлениям исследования «Физико-химическая

гидромеханика», «Гидродинамическая устойчивость», «Тепломассоперенос в газах и жидкостях». Диссертационная работа И. А. Шефера «Устойчивость двухслойных течений в горизонтальном канале при диффузионном испарении» является завершённым научным исследованием. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9-11 (раздел II) «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Шефер Илья Александрович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв подготовлен д.ф.-м.н. (01.04.14 – теплофизика и молекулярная физика) профессором кафедры теоретической и компьютерной гидроаэродинамики Института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича Южного федерального университета Владимиром Андреевичем Батищевым (344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8-а, тел. 8 905 478 6756, e-mail: batishev-v@mail.ru).

Отзыв на диссертацию рассмотрен и утверждён на заседании кафедры теоретической и компьютерной гидроаэродинамики Института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» (протокол № 4 от 7 апреля 2023 г.).

Заведующий кафедрой теоретической
и компьютерной гидроаэродинамики
Института математики, механики и
компьютерных наук им. И. И. Воровича
Южного федерального университета
д.ф.-м.н, доцент



Цибулин Вячеслав Георгиевич

10 апреля 2023 г.

